

Ультразвуковые расходомеры газа с накладными датчиками

А. Д. Мансфельд^{1,*}, А. Г. Санин¹, Г. П. Волков¹, Р. В. Беляев¹, Д. В. Мороскин²
¹Федеральный исследовательский центр «Институт прикладной физики Российской академии наук»
Россия, 603950, Нижний Новгород, ул. Ульянова, д. 46
²ЗАО «Ультраметр». Россия, 607188, Саров, ш. Южное, д. 12
(Статья поступила 12.09.2017; Подписана в печать 20.09.2019)

Описаны два типа ультразвуковых расходомеров газа с накладными датчиками, осуществляющих измерение газового потока через металлическую стенку трубы. Основным достоинством разработанных расходомеров является возможность измерения расхода газа даже при низком давлении, без врезки датчиков в стенку. Рассматриваются различные способы локации (импульсный, непрерывный), влияние «стеночных» сигналов, способы выделения полезного сигнала. Приводятся результаты лабораторных и натурных испытаний.

PACS: 43.35.Yb УДК: 534.08

Ключевые слова: ультразвуковые расходомеры, ультразвуковая локация, корреляционные измерения.

ВВЕДЕНИЕ

Использование ультразвуковых расходомеров газа с внешними накладными датчиками имеет ряд преимуществ в сравнении с расходомерами, использующими врезные датчики. Подобные устройства не требуют врезки в трубопровод, соответственно, не загрязняются, не влияют на сам поток газа, не подвергаются абразивному воздействию твердыми частицами, находящимися в потоке. Эти расходомеры можно применять для контроля потоков газа на трубопроводах, не имеющих специальной подготовки. Основной трудностью при создании таких устройств является малый коэффициент прохождения ультразвукового сигнала (порядка 10^{-5}) из-за огромного различия акустических импедансов стенки трубы и газа. Вместе с тем при зондировании в стенке трубы возбуждаются волны различных типов, которые имеют существенно большую амплитуду, чем волна, распространяющаяся через газ (далее «стеночные» сигналы). В разработанных устройствах применяются несколько отличающиеся методики подавления «стеночных» сигналов, основанные на различии их свойств и свойств полезных сигналов: «стеночные» сигналы стационарны, полезный сигнал, прошедший через турбулентный поток, — пульсирующий.

1. ВРЕМЯПРОЛЕТНЫЙ РАСХОДОМЕР С ПОДАВЛЕНИЕМ СТАЦИОНАРНЫХ СИГНАЛОВ

Работа расходомера основана на изменении времени распространения сигнала, распространяющегося вверх и вниз по течению. Приборов с врезными датчиками, работа которых основана на использовании сноса ультразвукового сигнала, довольно много, теория и принципы их работы описана в многочисленных публикациях, например [1, 2]. Работа расходомера с накладными

датчиками имеет отличие. Оно заключается в том, что время распространения волны в газе постоянно и не зависит от скорости газа. От скорости зависит место падения ультразвукового пучка, прошедшего через газ на стенку трубы и, соответственно, время распространения сигнала по стенке. Схемы зондирования показаны на рис. 1. Ультразвуковой датчик возбуждает в стенке трубы тот или иной тип волны Лэмба (обычно S_0 или A_0), которая, распространяясь, возбуждает волну, распространяющуюся в газе. Зондирование производится поочередно вверх и вниз по потоку. Принятые сигналы представляют собой цуги импульсов, среди которых, находится полезный сигнал, прошедший через газ. Для выделения полезного сигнала нами был использован метод череспериодного вычитания импульсов, в результате которого стационарные сигналы, распространяющиеся по стенке трубы, существенно подавляются, а полезные сигналы, прошедшие через газ, накапливаются и анализируются. При этом измеряются времена распространения сигналов вверх и вниз по потоку с последующим вычислением скорости потока с помощью простых вычислений [3–5]. На рис. 2 показаны осциллограммы принимаемых сигналов и сигналов, выделенных с помощью череспериодного вычитания. Испытания разработанной аппаратуры в натурных условиях показали достаточно высокую точность (1.4% в сравнении с эталоном), достаточную для многих приложений.

Недостатком данного метода является трудность его применения с потоками газа, содержащего жидкие частицы, например, попутного нефтяного газа. В этом случае капли, оседающие на стенках и возбуждаемые набегающим потоком, модулируют «стеночные» сигналы, что приводит к возникновению сильных помех, однако, при больших давлениях газа и это не является препятствием, т.к. полезный сигнал быстро растет с давлением. Кроме того, необходима корректировка показаний при изменении температуры трубы, т.к. при этом изменяется скорость волны Лэмба, входящая в выражение для вычисления скорости потока [5].

*E-mail: amansfeld@appl.sci-nnov.ru

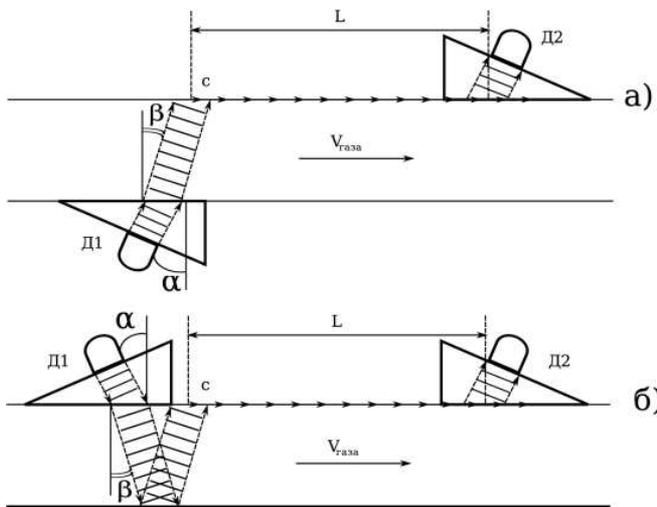


Рис. 1: Схема локации в режимах зондирования: а — на просвет, б — в режиме отражения от противоположной стенки трубы

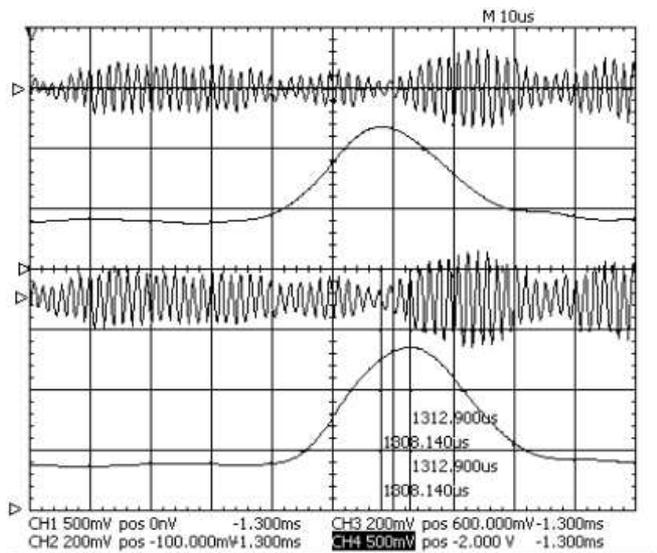


Рис. 2: Осциллограммы сигналов: сверху сигнал, принимаемый датчиком при зондировании вниз по потоку, ниже — сигнал, прошедший через газ после подавления «стеночных» сигналов, далее — то же при зондировании вверх по потоку

2. КОРРЕЛЯЦИОННЫЙ РАСХОДОМЕР С НАКЛАДНЫМИ ДАТЧИКАМИ

Второй тип измерителя — корреляционный. Первые работы по теории корреляционных расходомеров описаны в [6, 7]. Разработанный в настоящей работе расходомер предназначен для измерения расхода газа в трубах (в том числе, попутного газа) с помощью ультразвукового зондирования через стенку трубы, без непосредственного контакта с газовым потоком. Основной особенностью реализованного расходомера является его работа в импульсно когерентном ре-

жиме локации. Импульсный режим позволяет, в отличие от непрерывного, существенно снизить влияние «стеночных» сигналов, т.к. за счет стробирования сигнал принимается только в момент прихода импульса, прошедшего через газ, а остальные сигналы, распространяющиеся по стенке, блокируются. Зондирование производится двумя парами датчиков, расположенными на поверхности трубы на расстоянии порядка диаметра трубы. Вихри, распространяющиеся с потоком, проходят сначала через один ультразвуковой пучок, а затем через другой. В результате происходит модуляция амплитуды и фазы сигналов, прошедших через газ. Сигналы подвергаются корреляционной обработке, при этом основной пик функции корреляции оказывается смещенным относительно нулевой задержки на расстояние, обратно пропорциональное скорости потока. По известному расстоянию между парами датчиков и измеренной задержке производится вычисление скорости. Блок-схема приведена на рис. 3.

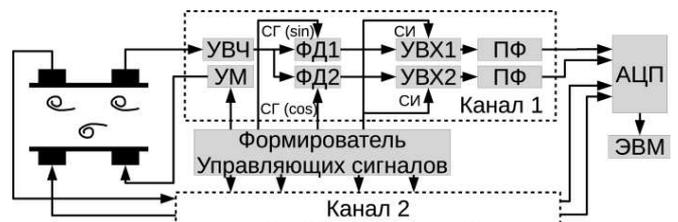


Рис. 3: Блок-схема корреляционного расходомера. УМ — усилитель мощности зондирующего сигнала, УВЧ — усилитель высокой частоты (приемник), ФД1 и ФД2 — фазовые детекторы, на которые подаются сигналы когерентного гетеродина, сдвинутые по фазе на 90°, УВХ — устройства выборки-хранения, выделяющие и запоминающие сигнал, пришедший с задержкой, соответствующей времени распространения через газ от излучающего до приемного датчика, ПФ — полосовой фильтр, отделяющий постоянную составляющую, соответствующую стационарным «стеночным» сигналам

Устройство состоит из двух одинаковых локационных трактов, каждый из которых, в свою очередь, состоит из передающего и приемного канала, которые «прозвучивают» трубу в поперечном направлении. При прохождении вихрей через ультразвуковой пучок происходит модуляция прошедшего сигнала по фазе и амплитуде. Эти флуктуации выделяются в приемном канале, и далее строится взаимно-корреляционная функция. Стационарные сигналы, обязанные распространению ультразвука по стенке трубы, на выходе устройства выборки/хранения выделяются в виде постоянной составляющей и удаляются с помощью фильтра. Переменная составляющая сигнала, ответственная за его распространение через турбулентный поток газа, обрабатывается компьютером, который выделяет амплитудные и/или фазовые флуктуации, строит корреляционную функцию и вычисляет значение линейной и объемной скорости. На рис. 4 показана корреляционная функция, по смещению основного пика которой опре-

деляется скорость потока.

Ультразвуковые расходомеры, как с врезными, так и накладными датчиками измеряют среднюю скорость вдоль ультразвукового пучка. Для практики же важен расход газа, т.е. объемная скорость. Для ее определения необходима информация о поперечном профиле скорости потока. Как и для расходомеров с врезными датчиками, используются известные расчетные зависимости формы профиля от числа Рейнольдса (формула Никурадзе) [8]. На рис. 5 показаны результаты сравнения показаний ультразвукового корреляционного и эталонного (СГ16МТ-400) расходомеров. Результаты получены на экспериментальной установке с металлической трубой диаметром 100 мм с толщиной стенки 4 мм.

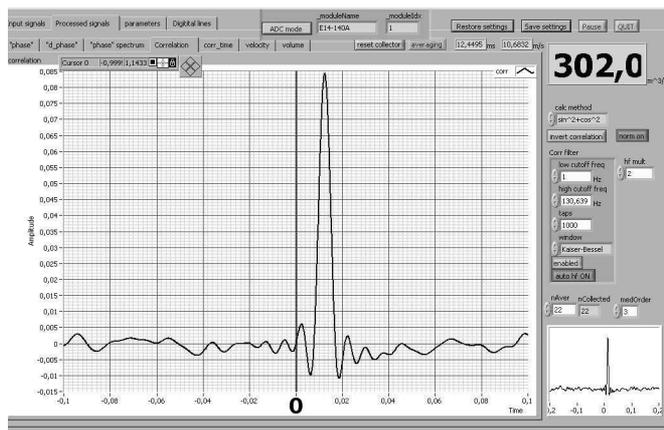


Рис. 4: Функция корреляции при скорости потока 10.6 м/с, в верхнем правом углу — расход в м³/ч

Пик функции корреляции хорошо наблюдается в широком диапазоне скоростей до значений порядка 50 м/с и, как это видно из рисунка, имеет место хорошее согласие с эталоном (отклонение менее 1%), за исключением участка низких скоростей. Это связано с изменением профиля скорости при низкоскоростном ламинарном течении (параболический профиль).

К сожалению, сравнение проведено лишь до расхода

400 м³/ч (соответствует скорости потока 3,5 м/с, число Рейнольдса 2.5×10^4), что ограничивалось возможностью контрольного измерителя.

К достоинствам корреляционного расходомера можно отнести малую чувствительность к наличию в потоке капель и твердых частиц, нечувствительность измерений к температуре стенки и газа, возможность локализации в широком диапазоне несущих частот, практически независимо от толщины стенки трубы. К недостатку корреляционного расходомера можно отнести невозможность работы с ламинарными потоками и потоками в зоне перехода к турбулентности.

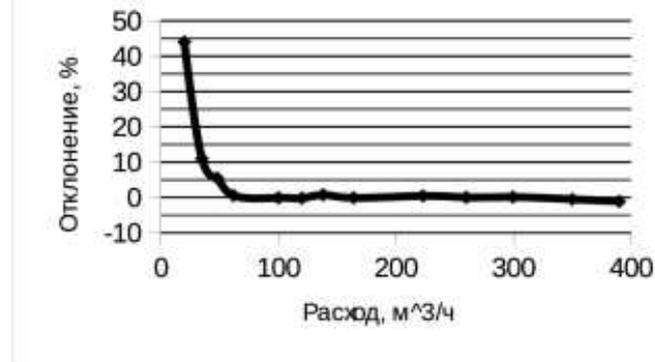


Рис. 5: Относительная погрешность измерения (в процентах) в зависимости от расхода (м³/ч) при контроле штатным расходомером

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Перечислим основные достоинства расходомеров с накладными датчиками: полная неинвазивность (все элементы прибора размещаются вне трубопровода, не создавая никаких помех потоку, не внося в него загрязнений и не подвергаясь воздействию со стороны потока), диапазон давлений газа начинается с атмосферного, что недоступно большинству конкурирующих приборов, возможность применения на трубах без их специальной подготовки.

- [1] Биргер Г.И., Бражников Н.И. Ультразвуковые расходомеры. М.: «Металлургия», 1964.
- [2] Lynnworth L. Ultrasonic flowmeters. Physical acoustics /Ed by W.Mason. 14. Academic press, 1979. P. 407.
- [3] Мансфельд А.Д., Волков Г.П., Агуреев В.А., Трусилло С.В., Карюк В.М. 20 сессия РАО. Сборник докладов. 2. С. 50.
- [4] Мансфельд А.Д., Трусилло С.В., Агуреев В.А., Карюк В.М. Способ измерения расхода газа в трубопроводах и устройство для его осуществления Патент РФ

№ 2313068. 2007. Оп. в Б.И. № 35.

- [5] Мансфельд А.Д., Волков Г.П., Агуреев В.А., Трусилло С.В., Карюк В.М., Мороскин Д.В. Датчики и системы. 2011. № 2. С. 28.
- [6] Coulthard J. Ultrasonics. 1973. 11(83). P. 8.
- [7] Worch A. Meas. Sci. Technol. 1998. 9. P. 622. Printed in the UK.
- [8] Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газа. М.: Наука, 1978. 736 с.

Ultrasonic gas flowmeters with laid-on sensors

A. D. Mansfeld^a, A. G. Sanin, G. P. Volkov, R. V. Beliaev, D. V. Moroskin

¹*Federal State Budgetary Scientific Institution «Federal Research Center The Institute of Applied Physics of the RAS.
N. Novgorod 603950, Russia*

²*«ULTRAMETR LLC». Sarov 607188, Russia
E-mail: ^amansfeld@appl.sci-nnov.ru*

Two types of ultrasonic flowmeters with laid-on sensors have been described realizing gas flow measurement through metal pipe wall. The main advantage of developed flowmeters is an ability to measure gas flow without sensor insertion into the wall even at low pressure. Different probing methods (pulse, continuous), "wall" signals influence, useful signal selection methods have been considered. Laboratory and field experimental results are presented.

PACS: 43.35.Yb

Keywords: ultrasonic flowmeters, ultrasonic probing, correlation measurements.

Received 12 September 2017.

Сведения об авторах

1. Мансфельд Анатолий Дмитриевич — доктор физ.-мат. наук, зав. лабораторией; тел.: (831) 436-56-60, e-mail: mansfeld@appl.sci-nnov.ru.
 2. Санин Анатолий Геннадьевич — науч. сотрудник; тел.: (831) 436-56-60, e-mail: agsanin@mail.ru.
 3. Волков Григорий Петрович — науч. сотрудник; тел.: (831) 416-49-76, e-mail: greg.volkov@ipfran.ru.
 4. Беляев Роман Владимирович — вед. инженер; тел.: (831) 416-49-76, e-mail: roman@medusa.su.
 5. Мороскин Дмитрий Викторович — ген. директор ООО «Ультраметр»; тел.: (831) 307-53-58, e-mail: moroskin@binar.ru .
-